

Juho Hulkkonen

# DC-MOOTTORIN NOPEUSSÄÄTÖ MUUT- TUVALLE KUORMALLE

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Juho Hulkkonen: DC-MOOTTORIN NOPEUSSÄÄTÖ MUUTTUVALLE KUORMALLE  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Helmikuu 2020

---

Työn tarkoituksena on suunnitella nopeussäätöjärjestelmä tasavirtamoottorille, jonka kuorma voi olla ajojen välillä muuttuva. Työ suoritetaan implementoimalla ja virittämällä vaatimukset täyttävä PI-säädin, joka säätää moottorin käyttöjännitettä asetusarvon ja kulmamittauksesta estimoidun kulmanopeuden perusteella.

Lisäksi työssä tutustutaan muutamiin erilaisiin tapoihin määrittää ensimmäisen kertaluokan järjestelmän aikavakio. Löydetyistä tavoista valitaan yksi ja sitä hyödyntämällä toteutetaan säätimelle kuorman hitausmomentin tunnistava kalibrointitoiminto. Kalibrointitoiminnon tarkoituksena on selvittää järjestelmän aikavakion perusteella kuorman hitausominaisuudet sekä virittää suunniteltu säädin havaittujen ominaisuuksien perusteella.

Järjestelmän tulee saavuttaa asetusarvo mahdollisimman lyhyellä asettumisajalla sekä 0 prosentin ylityksellä. Kalibrointitoiminnon on tuotettava riittävän laadukas viritys pyöriville kuormille, joiden massat vaihtelevat nimellismassasta aina 250 % massa.

Työn tuloksena saadaan vaatimusten mukainen säätöjärjestelmä, jota testataan sekä simulaattorilla että reaalisella järjestelmällä. Tuotetun järjestelmän ominaisuuksia arvioidaan myös muun muassa Gang-Of-Four-siirtofunktioiden avulla.

Avainsanat: aikavakio, 1. kertaluokan järjestelmä, PI-säädin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. JÄRJESTELMÄN ESITTELY .....	2
2.1 Quanser QUBE-Servo 2 -järjestelmä .....	2
2.2 Differentiaaliyhtälömalli sekä alkeislohkokaavio .....	3
2.3 Siirtofunktiomalli .....	5
2.4 Siirtofunktion identifiointi .....	6
2.5 Taajuusvaste .....	7
2.6 Prosessin stabiilius ja fysikaaliset vaatimukset .....	7
3. AIKAVAKION MÄÄRITYS .....	9
3.1 Aikavakion määrittäminen askelvasteen avulla .....	9
3.2 Aikavakion määrittäminen kuvaajan sovituksella .....	10
3.3 Aikavakion määrittäminen muutosnopeuden avulla .....	10
4. SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE .....	11
4.1 Käytettävä säädintyyppi .....	11
4.2 Kulmanopeuden estimointi .....	12
4.3 Kalibrointitoiminto .....	13
5. SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN PARAMETRISOINTI .....	15
5.1 Vaatimusmäärittelyt .....	15
5.2 PI-säätimen viritys .....	16
5.3 Kulmanopeusestimaattorin viritys .....	18
6. TESTAUS .....	19
6.1 Kulmanopeusestimaattorin testaus .....	19
6.2 Kalibrointitoiminto .....	20
6.3 PI-säätimen testaus .....	21
6.4 Todellisen järjestelmän testaus .....	23
6.5 Gang-Of-Four-tarkastelu .....	23
7. YHTEENVETO .....	26
LÄHTEET .....	27
LIITE A: KALIBROINNIN SUORITettava TILAKONE .....	28

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

DC	engl. direct current, tasavirta
back-emf	engl. back-electromotive force, sähkömotoristinen voima
$A$	askelkoko
$a, c$	vakiokertoimet
$d$	kuormitushäiriö
$e(t)$	erosuure
$e_b$	sähkömotoristinen voima
$f(s)$	ylipäästösuotimen siirtofunktio
$G_{avoin}(s)$	avoimen järjestelmän siirtofunktio
$G_e(s)$	estimaattorin siirtofunktio
$G_p(s)$	prosessin siirtofunktio
$G_{pi}(s)$	säätimen siirtofunktio
$G_s(s)$	menohaaran siirtofunktio
$G_{suljettu}(s)$	suljetun järjestelmän siirtofunktio
$H_s(s)$	takaisinkytkennän siirtofunktio
$i$	virta
$i_m$	servomoottorin virta
$J_d$	inertiakiekon hitausmomentti
$J_{eq}$	kokonaishitausmomentti
$J_h$	moduulin kiinnityspisteen hitausmomentti
$J_m$	roottorin hitausmomentti
$k_m$	sähkömotoristinen voimavakio
$k_t$	servomoottorin vääntövakio
$K_{dc}$	prosessin vakiovahvistus
$K_p$	säätimen vakiovahvistus
$L$	induktanssi
$L_m$	servomoottorin induktanssi
$m_d$	inertiakiekon massa
$n$	mittaushäiriö
$r$	asetusarvo
$r_d$	inertiakiekon säde
$R$	vastus
$R_m$	servomoottorin vastus
$s$	Laplace-muuttuja
$T_i$	säätimen integrointiaika
$U(s)$	sisäänmenon Laplace-muunnos
$v$	jännite
$v_m$	servomoottorin lähdejännite
$w_f$	kaistanleveys
$Y(s)$	ulostulon Laplace-muunnos
$y(t)$	ulostulo
$\tau_m$	vääntömomentti
$\omega_m$	kulmanopeus
$\tau_p$	prosessin aikavakio

# 1. JOHDANTO

Tasavirta- eli DC-moottorit ovat laajassa käytössä sekä kuluttaja- että teollisuustuotteissa. Niiden hyötyihin kuuluvat muun muassa halpa hankintahinta, säädettävyys ja ohjauksen toteuttamisen helppous. Lisäksi tasavirtamoottoreista saatava teho on hyvä suhteessa niiden kokoon. Tasavirtamoottoreita käytetään erityisesti, kun tarvitaan tarkkaa paikoitusta tai vaihtosähköä ei ole saatavilla. Esimerkiksi robotiikka- tai työstökonesoveluksissa tasavirtamoottoreiden käyttö on hyvin yleistä. Servomoottorit ovat tasavirtamoottoreiden alaluokka, johon kuuluvat moottorit kykenevät antamaan tietoa omasta tilastaan mittauksen avulla.

QUBE-Servo 2 -järjestelmä on opetuskäyttöön tarkoitettu servomoottorijärjestelmä, joka tukee Matlab/Simulink- sekä LabView-ympäristöissä tehtyjä ohjausratkaisuja. Tässä työssä suunnitellaan Quanser QUBE-Servo 2 -järjestelmän ohjausratkaisu, joka huomioi moottorin kuorman muuttuvat inertiaominaisuudet. Muutokset huomioidaan rakentamalla moottoria ohjaavan säätimen rinnalle kalibrointiosa, jolla saadaan varmistettua määriteltujen vaatimusten täyttyminen kuormasta ja sen inertiaasta riippumatta.

Seuraavassa luvussa esitellään työssä käytettävä järjestelmä ja johdetaan siitä tarvittavat mallit. Kolmannessa luvussa tutustutaan erilaisiin menetelmiin identifioida ensimmäisen kertaluokan malli askelvasteen tai sen osan perusteella. Neljännessä luvussa esitellään käytettävän säätöjärjestelmän rakenne ja sen valintaan vaikuttaneet tekijät. Luvussa esitellään myös työssä käytettävä säätimen kalibrointiosa. Tämän jälkeen säätöjärjestelmälle esitellään säätölaki, jonka mukaan parametrisoitu säädin toteuttaa ohjausjärjestelmälle määritellyt vaatimukset. Kuudes luku sisältää suunnitellun säätöjärjestelmän testauksen sekä siitä saadut tulokset. Järjestelmää analysoidaan myös muodostettujen mallien avulla muun muassa herkkyystarkastelulla. Viimeisenä on yhteenveto työn sisällöstä ja saaduista tuloksista. Yhteenveto sisältää myös muutamia parannusehdotuksia toteutetun säätimen kehittämiseen.

## 2. JÄRJESTELMÄN ESITTELY

Tässä luvussa esitellään työssä käytettävän tasavirtamoottorin malli, jonka perusteella säätösuunnittelua tehdään. Differentiaaliyhtälömallin perusteella saadaan vastaava siirtofunktioesitys, joka identifioidaan vastaamaan reaalista järjestelmää. Luvussa esitellään myös järjestelmän taajuusvaste ja järjestelmän asettamat vaatimukset suunniteltavalle säätimelle.

### 2.1 Quanser QUBE-Servo 2 -järjestelmä

Työssä käytettävä järjestelmä on Quanserin valmistama servomoottorisysteemi, joka sisältää servomoottorin optisella paikan mittauksella. Mittauksen resoluutio on 2048 yksikköä kierroksella. QUBE-Servo 2 sisältää järjestelmärajapinnan tietokoneen käyttöön, joka kytketään USB2-portin kautta. QUBE-Servo 2:n virran syöttöön käytetään erillistä ulostuloltaan 24 voltin ja 2,71 ampeerin tasavirtalähdettä. [1, s. 9] Servomoottorin kulmanopeutta säädetään ohjaamalla moottorille tulevaa jännitettä takaisinkytketyn säätimen avulla. Moottorin hetkellinen kulmanopeus saadaan laskettua moottorin paikan mitaustietoa hyödyntäen. Työssä käytettävä järjestelmä on kuvassa 2.1.

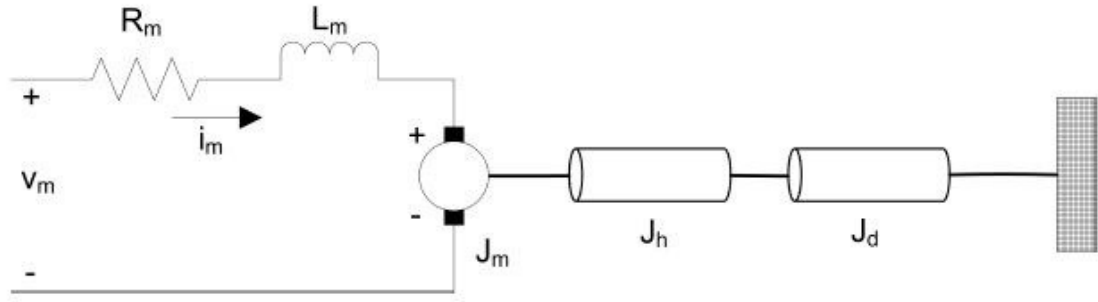


**Kuva 2.1.** Työssä käytettävä Quanserin QUBE-Servo 2 -järjestelmä [1, s. 11]

QUBE-Servo 2 sisältää servomoottorin, sen virransyöttöyksikön sekä ohjausrajapinnan vaatimat komponentit. Laatikon ulkopuolella on servomoottorin pyörittämä inertia kiekko, joka on moottorin kuormana. Työssä käsiteltävä muuttuva inertia luodaan tämän kiekon ominaisuuksia muuttamalla.

## 2.2 Differentiaaliyhtälömalli sekä alkeislohkokaavio

Työssä käytettävä moottori on harjallinen 18 V:n tasavirtamoottori [1, s. 6]. Moottorin kytkentäkaavio esitellään kuvassa 2.2, jossa  $v_m$  on lähdejännite,  $R_m$  moottorin vastus,  $i_m$  johtimessa kulkeva virta ja  $L_m$  moottorin induktanssi.



**Kuva 2.2.** Tasavirtamoottorin malli [2, s. 3]

Kuvaan 2.2 merkittyjen suureiden lisäksi täytyy huomioida moottorin liikettä vastustava sähkömotorinen voima  $e_b(t)$ . Kyseinen voima määritellään seuraavasti:

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t), \quad (2.1)$$

jossa  $k_m$  on back-emf (electromotive force) -vakio ja  $\omega_m(t)$  moottorin kulmanopeus ajan funktiona. Kirchoffin jännitelailalla voidaan kirjoittaa kuvan 2.2 perusteella yhtälö

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - L_m \frac{di_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0. \quad (2.2)$$

Koska moottorin induktanssi  $L_m$  on huomattavasti sen vastusta  $R_m$  pienempi, voidaan se jättää huomioimatta. Tällöin moottorin yhtälö suppenee muotoon

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0. \quad (2.3)$$

Induktanssin huomiotta jättäminen poistaa järjestelmästä yhden reaalisen ja negatiivisen navan. Tämän vaikutuksesta järjestelmän kokonaismalliin palataan alaluvussa 2.5.

Ratkaistaan yhtälöstä (2.3) moottorin virta:

$$i_m(t) = \frac{v_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m}. \quad (2.4)$$

Moottorin pyörittämän kokonaiskuorman yhtälö on muotoa

$$J_{eq} \dot{\omega}_m(t) = \tau_m(t), \quad (2.5)$$

jossa  $J_{eq}$  on moottorin akseliin kohdistuva kokonaishitausmomentti ja  $\tau_m(t)$  moottorin tuottama vääntömomentti ajan funktiona. Vääntömomentti on myös suoraan verrannollinen moottorin piirissä kulkevaan virtaan. Näin saadaan

$$\tau_m(t) = k_t i_m(t). \quad (2.6)$$

Sijoittamalla yhtälöt (2.5) ja (2.6) yhtälöön (2.4) saadaan

$$J_{eq} \dot{\omega}_m(t) = k_t i_m(t) = k_t \frac{v_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m}, \quad (2.7)$$

josta voidaan ratkaista moottorin differentiaaliyhtälömalli korkeimman derivaatan mukaan

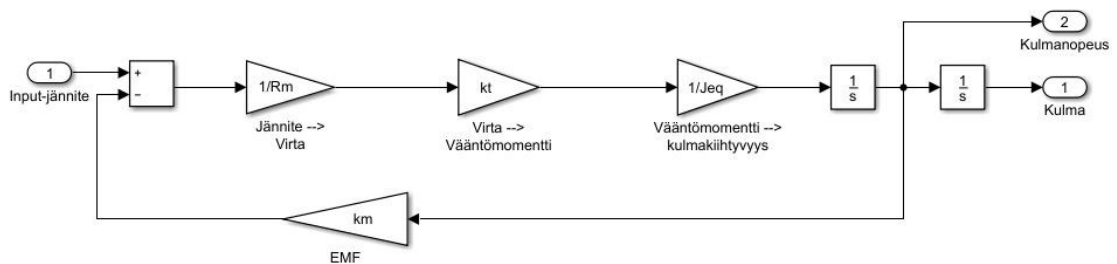
$$\dot{\omega}_m(t) = \frac{k_t}{R_m J_{eq}} v_m(t) - \frac{k_t k_m}{R_m J_{eq}} \omega_m(t). \quad (2.8)$$

Yhtälöt (2.1–2.8) on johdettu lähteen [2, s. 2–3] mukaan.

Moottorin akseliin kohdistuva kokonaishitausmomentti voidaan esittää myös hitausmomenttien  $J_m$ ,  $J_h$  ja  $J_d$  summana:

$$J_{eq} = J_m + J_h + J_d, \quad (2.9)$$

jossa  $J_m$  on roottorin,  $J_h$  moduulin kiinnityspisteen ja  $J_d$  inertia kiekon hitausmomentti. Differentiaaliyhtälön avulla voidaan muodostaa järjestelmää kuvaava alkeislohkokaavio [3, s. 203].



**Kuva 2.3.** Servomoottorin alkeislohkokaavio

Kuvan 2.3 alkeislohkokaavion perusteella voidaan muodostaa järjestelmän siirtofunktioiden esitys, joka tullaan tarkemmin esittelemään seuraavassa alaluvussa.



## 2.3 Siirtofunktiomalli

Siirtofunktiot ovat lineaaristen ja aikainvarianttien differentiaaliyhtälöiden esityksiä järjestelmän tai prosessin ulostulon ja sisäänmenon Laplace-muunnosten suhteena. Siirtofunktioita käytetään kuvaamaan systeemin, järjestelmän tai prosessin dynamiikkaa Laplace-muuttujan  $s$  funktiona. Siirtofunktioiden käyttäminen helpottaa järjestelmän mallintamista, analysointia ja suunnittelua. [3, s. 70–71] Siirtofunktio on yleisesti ulostulon ja sisäänmenon Laplace-muunnosten suhde [4, s. 15].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.10)$$

Järjestelmän siirtofunktio voidaan muodostaa Laplace-muunnoksella aikatazon differentiaaliyhtälöstä tai vaihtoehtoisesti käyttämällä apuna aikatazon differentiaaliyhtälön perusteella tehtyä alkeislohkokaaviota sekä siihen sovellettavia laskusääntöjä. Tarvittava laskusääntö negatiivisesti takaisinkytketylle järjestelmälle on

$$G_p(s) = \frac{G_s(s)}{1 + G_s(s)H_s(s)}, \quad (2.11)$$

jossa  $G_p(s)$  on tuloksena saatava prosessin siirtofunktio,  $G_s(s)$  menohaaran ja  $H_s(s)$  paluuhaaran siirtofunktio [4, s. 19]. Servomootorin tapauksessa kuvan 2.3 perusteella pätee seuraavat yhtälöt:

$$G_s(s) = \frac{1}{R_m} k_t \frac{1}{J_{eq}} \frac{1}{s} = \frac{k_t}{R_m J_{eq} s}, \quad (2.12)$$

$$H_s(s) = k_m$$

Yhtälöiden (2.11) ja (2.12) avulla saadaan prosessin eli tässä tapauksessa servomootorin ja inertia kiekon yhdistelmän siirtofunktioksi

$$G_p(s) = \frac{\frac{k_t}{R_m J_{eq} s}}{1 + \frac{k_t}{R_m J_{eq} s} k_m} = \frac{\frac{1}{k_m}}{\frac{J_{eq} R_m}{k_t k_m} s + 1}. \quad (2.13)$$

Yhtälöstä (2.13) nähdään prosessin aikavakion  $\tau_p$  ja DC-vahvistuksen  $K_{dc}$  olevan muotoa

$$\tau_p = \frac{J_{eq} R_m}{k_t k_m}, \quad (2.14a)$$

$$K_{dc} = \frac{1}{k_m} \quad (2.14b)$$

Yhtälöiden (2.13) ja (2.14) perusteella inertiaikiekon ominaisuudet vaikuttavat vain aikavakioon ja vakiovahvistukseen vaikuttaa vain vakioparametri  $k_m$ . Seuraavassa alaluvussa parametrisoidaan saatu siirtofunktio vastaamaan käytettävää järjestelmää.

## 2.4 Siirtofunktion identifiointi

Järjestelmän siirtofunktiomallin parametrien nimelliset arvot ovat koottuna taulukkoon 1.

**Taulukko 2.1.** QUBE-Servo 2 -järjestelmän parametrit [1, s. 8]

Muuttuja	Arvo
<b>Servomoottorin parametrit</b>	
$R_m$	8,4 $\Omega$
$k_t$	0,042 N-m/A
$k_m$	0,042 V/(rad/s)
$J_m$	$4,0 \times 10^{-6}$ kg-m <sup>2</sup>
$J_h$	$0,6 \times 10^{-6}$ kg-m <sup>2</sup>
<b>Inertiaikiekon parametrit</b>	
$m_d$	0,053 kg
$r_d$	0,0248 m

Inertiaikiekon hitausmomentti  $J_d$  voidaan laskea kiekon massan  $m_d$  ja säteen  $r_d$  avulla

$$J_d = \frac{1}{2} m_d r_d^2 = 1,6299 \times 10^{-5}. \quad (2.15)$$

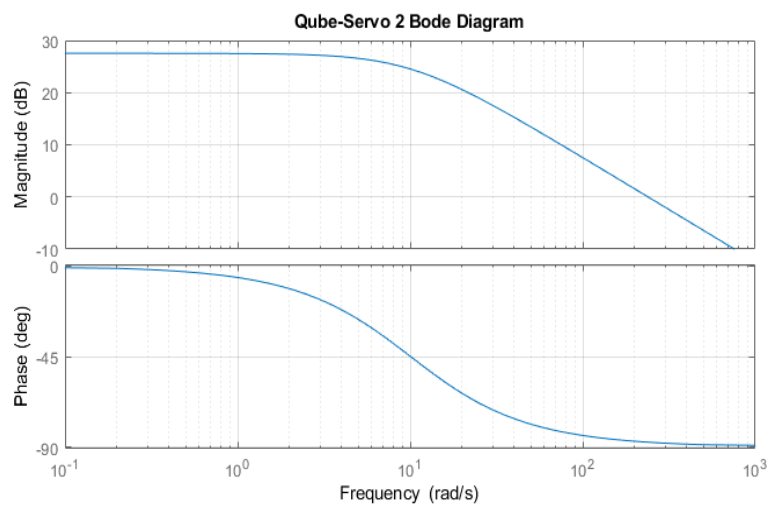
Käyttämällä yhtälöitä (2.9, 2.13 ja 2.15) taulukon 2.1 arvoilla saadaan siirtofunktioksi

$$G_p = \frac{23,8095}{0,09952s + 1}. \quad (2.16)$$

Siirtofunktion mukaan prosessin aikavakio on noin 0,1 sekuntia ja DC-vahvistus noin 23,8. Siirtofunktion ominaisuuksia voi arvioida esimerkiksi taajuusvasteen avulla.

## 2.5 Taajuusvaste

Siirtofunktiota (2.16) käyttämällä saadaan laskettua kyseisen prosessin taajuusvaste servomoottorin syöttöjännitteestä moottorin kulmanopeuteen. Taajuusvasteen avulla voidaan arvioida prosessin dynaamista käyttäytymistä. Vahvistus taajuuden funktiona kertoo prosessin luontaisesta kyvystä vahvistaa tai vaimentaa tietyllä taajuudella esiintyviä ohjauksia tai häiriöitä. Liiallinen vaihesiirto voi aiheuttaa suljettuun järjestelmään resonansseja. Vaihesiirron ylittäessä  $-180$  astetta, on prosessin dB-vahvistuksen oltava negatiivinen. Taajuusvasteen muodosta voidaan arvioida tarvittavia säätimen ominaisuuksia.



**Kuva 2.4.** Järjestelmän Bode-diagrammi

Kuvan 2.4 taajuusvasteesta nähdään järjestelmällä olevan luontaista vaimennusta suurilla taajuuksilla. Systeemin vaihesiirto laskee nolasta  $-90$  asteeseen taajuuden kasvaessa nolasta äärettömään. Alaluvussa 2.2 pois jätetty induktanssin vaikutus poistaa järjestelmästä yhden navan. Poistettu napa aiheuttaisi järjestelmälle korkeilla taajuuksilla  $-90$  astetta vaihesiirtoa ja vahvistuksen jyrkemman pudotuksen,  $-40$  dB/s, joten todellisen järjestelmän vaihesiirto poikkeaa korkeilla taajuuksilla esitetystä. Tämä tulee huomioida järjestelmän stabiilisuutta arvioidessa. Seuraavassa alaluvussa käsitellään järjestelmän ominaisuuksia tarkemmin säätimen suunnitteluun liittyen.

## 2.6 Prosessin stabiilius ja fysikaaliset vaatimukset

Prosessi on stabiili, kun sen kaikki navat, eli nimittäjän nollakohdat, sijaitsevat s-tason vasemmalla puolitasolla [6, s. 182]. Prosessin navat ovat yhtälön (2.13) nimittäjän nollakohdat eli QUBE-Servo 2 -prosessin ainut napa on yhtälön

$$\frac{J_{eq}R_m}{k_t k_m} s + 1 = 0 \quad (2.17)$$

ratkaisu. Taulukon 1 mukaan muuttujat  $J_{eq}$ ,  $R_m$ ,  $k_t$  ja  $k_m$  saavat aina positiiviset arvot, joten muuttujan  $s$  nollakohta on aina negatiivinen. Voidaan todeta QUBE-Servo 2 -prosessin olevan aina stabiili. Tämä tarkoittaa äärellisen ohjauksen tuottavan aina äärellisen ulostulon [3, s. 73-76]. Lisäksi kuvassa (2.4) esitellyn järjestelmän taajuusvasteen mukaan järjestelmän käyttäytyminen on hyvin ennakoitavissa, joten säätimen suunnittelulle ei tule rajoitteita prosessin mallin ominaisuuksista.

Prosessin ohjauksessa on huomioitava moottorin jännitteen- ja virransyötön rajoitteet. Servomoottorin sallittu maksimivirta on jatkuvana 0,5 A ja hetkellisenä 2 A. Suositeltu käyttöjännitealue on  $\pm 10 V$  ja hetkellinen maksimijännite  $\pm 15 V$ . [1, s. 8] Säätimen suunnittelussa tulee huomioida nämä rajoitteet, koska ne tekevät systeemistä epälineaarisen.

Seuraavassa luvussa esitellään muutamia prosessin aikavakion laskemiseen käytettäviä menetelmiä, joista tullaan myöhemmin valitsemaan yksi kalibrointitoiminnon toteuttamista varten.

### 3. AIKAVAKION MÄÄRITYS

Tässä työssä käytetään järjestelmän aikavakioon perustuvaa säätimen viritystapaa. Aikavakio kertoo järjestelmän nopeudesta saavuttaa tasapainotila sisääntulon muuttuessa [3, s. 63]. Järjestelmä pienellä aikavakiolla reagoi ja saavuttaa tasapainotilan nopeammin verrattuna suuren aikavakion järjestelmiin. Aikavakion määrittämiseen kokeellisesti ensimmäisen kertaluokan järjestelmästä on useita eri keinoja, joista osa tullaan esittelemään tässä luvussa.

#### 3.1 Aikavakion määrittäminen askelvasteen avulla

Ensimmäisen kertaluokan järjestelmän aikavakio voidaan määrittää syöttämällä vakiotilassa olevaan järjestelmään askelmainen muutos. Muutoksen vaikutuksesta järjestelmän ulostuloon voidaan laskea kyseisen järjestelmän aikavakio. Aikavakiovahvistusmuodossa olevan järjestelmän ulostulon  $Y(s)$  Laplace-muunnos on muotoa

$$Y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} U(s), \quad (3.1)$$

jossa  $U(s)$  on sisäänmenon siirtofunktio. Syöttämällä järjestelmään suuruudeltaan  $A$  oleva askelohjaus ja laventamalla siirtofunktio aikavakio  $\tau$ :n käänteisluvulla, saadaan

$$Y(s) = \frac{K}{\tau} \frac{1}{s} \frac{A}{s + \frac{1}{\tau}}. \quad (3.2)$$

Laplace-käänteismuunnoksella yhtälö (3.2) saadaan muotoon

$$y(t) = \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}\right)KA. \quad (3.3)$$

Sijoittamalla yhtälöön (3.3) ajan  $t$  paikalle  $\tau$ , saadaan järjestelmän ulostulon tila aikavakion määrittämällä ajanhetkellä.

$$y(\tau) \sim 0,632KA \quad (3.4)$$

Yhtälön (3.4) sekä askelvastedatan perusteella voidaan laskea järjestelmän aikavakio. Aikavakio on hetkellä, kun prosessin ulostulo saa arvon  $y(\tau)$ . Aikavakion johtaminen on mukailtu lähteestä [4, s. 161].

### 3.2 Aikavakion määrittäminen kuvaajan sovituksella

Aikavakio voidaan määrittää askelvasteen osan perusteella hyödyntämällä tietoa ensimmäisen kertaluokan järjestelmän askelvasteen aikatason yhtälöstä (3.3). Aikavakio määritetään sovittamalla kerättyyn datajoukkoon sopiva kuvaaja. Kuvaaja sovitetaan askelmuutoksen aikana kerättyjen aika- ja ulostulodatojen avulla. Muokkaamalla yhtälöä (3.3) saadaan

$$y(t) = KAe^0 - e^{-\frac{1}{\tau}t}, \quad (3.5)$$

joka vastaa muotoa  $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$ . Kuvaaja voidaan sovittaa esimerkiksi Matlab:n komennolla "fit", joka palauttaa kertoimet  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ja  $d$  [5]. Aikavakio  $\tau$  on kertoimen  $d$  käänteisluvun vastaluku.

Sovittamalla datajoukkoon kuvaaja tarvitaan askelvasteesta vain osa ja loppu voidaan laskea. Edellä mainittua komentoa käyttäen pienin käytettävä datamäärä on neljä ajan ja ulostulon muodostamaa paria. Kuvaajan sovituksella dataa ei tarvitse odottaa kokonaan saataville, joten laskenta on huomattavasti nopeampi verrattuna aikavakion laskentaan alaluvussa 3.1 esitetyllä menetelmällä.

### 3.3 Aikavakion määrittäminen muutosnopeuden avulla

Järjestelmän aikavakio voidaan määrittää käyttämällä tietoa tasapainotilan arvosta sekä ulostulon muutosnopeudesta askelhetkellä. Derivoimalla yhtälö (3.3) saadaan ulostulon muutosnopeudeksi

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{AK_{dc}}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.6)$$

Ottamalla tästä raja-arvo ajan lähestyessä nollaa, saadaan

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy(t)}{dt} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{AK_{dc}}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{AK_{dc}}{\tau}. \quad (3.7)$$

Yhtälön (3.7) perusteella saadaan aikavakion arvoksi

$$\tau = \frac{AK_{dc}}{\frac{dy(t)}{dt}}, \quad t = 0. \quad (3.8)$$

Tästä nähdään järjestelmän aikavakion olevan tasapainotilan ja askelhetken ulostulon derivaatan suhde.

Seuraavassa luvussa esitellään säätöjärjestelmän rakenne ja kalibrointiosan toteutus, johon tässä luvussa esitellyt aikavakion laskumenetelmiä hyödynnetään.

## 4. SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE

Tässä luvussa esitellään QUBE-Servo2 -järjestelmälle suunniteltu ja toteutettu pyörimisnopeuden säätöjärjestelmä. Järjestelmä sisältää säätimen, kulmanopeusestimaattorin sekä säätimen parametreja päivittävän kalibrointiosan. Säätöjärjestelmän tarkoituksena on ohjata prosessia halutulla tavalla ja toteuttaa kokonaisjärjestelmälle asetetut vaatimukset.

### 4.1 Käytettävä säädintyyppi

Yhtälöstä (2.15) nähdään säädettävän prosessin olevan ensimmäistä kertaluokkaa eikä se sisällä integraattoria. Kyseisen järjestelmän säädössä päätettiin käyttää erityisesti prosessiteollisuudessa hyvin yleistä PI-säädintä. PI-säädin koostuu kahdesta eri osasta (P ja I), joiden ulostuloja summaamalla saadaan itse säätimen ulostulo. Säätimen osat voidaan virittää tarvittaessa toisistaan riippumatta, joten säädin toimii hyvin ja halutuilla ominaisuuksilla erityisesti yksinkertaisissa säätötehtävissä. Säätimen P- eli proportionaaliosa laskee ohjausta vahvistamalla/vaimentamalla erosuuretta halutulla vahvistuskertoimella. Vahvistuskertoimen kasvattaminen nopeuttaa järjestelmää. Säätimen integrointi- eli I-osa laskee ohjausta edellisten erosuureiden integraalina, joten se säätää järjestelmää sen historian perusteella. I-osalla voidaan poistaa myös järjestelmän tasapainotilan virhe. [3, s. 23–24]

PI-säätimen yleinen aikatazon yhtälö on muotoa

$$y(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt), \quad (4.1)$$

jossa  $y(t)$  on ulostulo ja  $e(t)$  sisäänmeno eli erosuure ajan funktioina,  $K_p$  on vahvistus ja  $T_i$  integrointiaika [6, s. 293]. Vahvistus  $K_p$  on koko säätimen vahvistus ja se vaikuttaa proportionaali- sekä integrointivahvistukseen. Integrointiajalla  $T_i$  säädetään haluttu integrointihaaran käyttäytyminen. Lyhyt integrointiaika kasvattaa I-haaran vahvistusta. PI-säätimen siirtofunktio saadaan muuntamalla aikatazon yhtälö (4.1) Laplace-tasoon. Säätimen ulostulon Laplace-muunnos on

$$Y(s) = K_p \left( U(s) + \frac{1}{T_i} \frac{1}{s} U(s) \right) = K_p \left( \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \right) U(s). \quad (4.2)$$

Yhtälöiden (2.10) ja (4.2) perusteella saadaan PI-säätimen siirtofunktioksi

$$G_{PI}(s) = K_p \left( \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \right). \quad (4.3)$$

PI-säätimellä on yhtälön (4.3) mukaan yksi napa origossa ja yksi nolla, jonka sijaintiin voidaan vaikuttaa integrointiajan valinnalla.

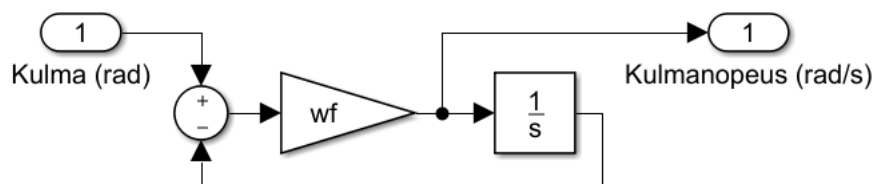
## 4.2 Kulmanopeuden estimointi

QUBE-Servo 2 -järjestelmästä on saatavana vain mittaustieto kiekon kulmasta. Pyörimisnopeussäädintä toteuttaessa säädin tarvitsee tiedon kiekon kulmanopeudesta, joten se estimoidaan sopivalla tavalla. Kulmanopeuden laskeminen ei onnistu suoraan derivoimalla kääntymiskulmaa derivointioperaation korkeita taajuuksia vahvistavien ominaisuuksien takia sekä lisäksi derivoinnin realisointi Laplace-tasossa on mahdotonta. Derivaattorin osoittajan asteluku (1) on korkeampi kuin sen nimittäjän asteluku (0), joten derivointi itsessään on myös määritelmällisesti epästabiili.

Tässä työssä kulmanopeuden estimointiin käytettiin yksinkertaista 1. kertaluokan ylipäästösuodinta, jolla saadaan estimoitua tarvittava kulmanopeustieto riittävän tarkasti. Suotimen siirtofunktio on [6, s. 297]

$$f(s) = \frac{w_f s}{s + w_f} = \frac{w_f}{1 + w_f \frac{1}{s}}, \quad (4.4)$$

jossa  $w_f$  on suotimen rajataajuus. Rajataajuus on taajuus, jolla suotimen estokaista vaihtuu päästökaistaksi. Sen valinta vaikuttaa suoraan suotimen ainoan navan sijaintiin ja näin ollen myös suotimen nopeuteen. Suuremmalla parametrilla  $w_f$  suodin reagoi nopeammin kulman muutoksiin ja muodostaa kulmanopeuden estimaatin lyhyemmässä ajassa. Yhtälöiden (2.11) ja (4.4) perusteella voidaan muodostaa suotimen alkeislohkokaavio, joka on kuvassa 4.1.



**Kuva 4.1.** Ylipäästösuotimen alkeislohkokaavio



Saatu kulmanopeuden estimaatti on tarpeeksi tarkka, jotta sitä voidaan hyödyntää säätimen suunnittelussa ja toteutuksessa. Estimaattorin siirtofunktio aikavakiovahvistusmuodossa on

$$G_e = \frac{s}{\frac{1}{w_f}s + 1}. \quad (4.5)$$

Estimaattorilla on yksi napa ja yksi nolla. Todellisuudessa järjestelmän siirtofunktio tulisi esittää muodossa, jossa QUBE-Servo 2 -prosessin siirtofunktio esitettäisi siirtofunktion asetusarvosta kulmaan ja tämän kanssa sarjassa oleva kulmanopeusestimaattori siirtofunktion kulmasta kulmanopeuteen. Tämä siirtofunktio on muotoa

$$G_{pe} = \frac{\frac{1}{k_m}}{\frac{J_{eq}R_m}{k_t k_m}s + 1} \frac{1}{s} \frac{s}{\frac{1}{w_f}s + 1}. \quad (4.6)$$

Siirtofunktiosta (4.6) nähdään estimaattorin nollan kumoavan prosessin integraattorin muodostaman navan. Virittämällä estimaattorin napa tarpeeksi nopeaksi sen vaikutus prosessin dynamiikkaan on olematon [3, s. 311–312]. Viritys tehdään siten että epäyhtälö

$$\frac{1}{w_f} \ll \frac{J_{eq}R_m}{k_t k_m} \quad (4.7)$$

toteutuu. Tämä tarkoittaa parametrin  $w_f$  valintaa siten että

$$w_f \gg 10. \quad (4.8)$$

Tulee kuitenkin huomioida parametrin  $w_f$  vahvistavat ominaisuudet esimerkiksi muodostettaessa estimaattia käyttäen kohinaista mittausta. Epäyhtälön (4.8) toteutuessa voidaan prosessin siirtofunktio olettaa asetusarvosta suoraan kulmanopeuteen ja estimaattorin voi yksinkertaistamisen vuoksi jättää pois muodostettaessa myöhemmin järjestelmän siirtofunktiomallia.

### 4.3 Kalibrointitoiminto

Säätimelle suunniteltiin online-kalibrointitoiminto, joka virittää säätimen toimimaan optimaalisesti muuttuneen kuorman kanssa. Kalibrointitoiminto ajetaan järjestelmän käynnistuksen yhteydessä. Toiminto syöttää avoimeen järjestelmään askelmaisen ohjausmuutoksen ja laskee uudet arvot säätimen viritysparametreille järjestelmän askelvasteen

perusteella. Kalibrointitoiminto käyttää aliluvussa 3.1 esiteltyä askelvasteen määrittystapaa. Toiminto on jaettu kolmeen osaan, jotka ovat: 1. Save\_data, 2. Count\_tau ja 3. Count\_parameters.

Vaiheen yksi aikana prosessiin syötetään askelsisäänmeno (10 V) ja ulostulosta saatava kulmanopeusdata tallennetaan ajan funktiona. Vaiheen kaksi ja kolme aikana saadusta datasta lasketaan aliluvun 3.1 mukaisesti prosessin sen hetkinen aikavakio ja saatu arvo sijoitetaan järjestelmän PI-säätimen integrointiajaksi.

Kalibrointitoiminnon suorittaman säätimen arvojen parametrisoinnin jälkeen PI-säädin vastaa QUBE-Servo 2 -järjestelmän nopeussäädöstä. Kalibrointitoiminnon suorittava ti-lakone on esiteltyä liitteessä A.

## 5. SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN PARAMETRISOINTI

Tässä luvussa esitellään säätöjärjestelmältä vaadittavat ominaisuudet ja vaatimukset sekä säätöjärjestelmän viritysratkaisu, jolla saavutetaan asetetut tavoitteet. Luvussa esitellään PI-säätimen, kulmanopeusestimaattorin sekä online-kalibrointitoiminnon parametrisoinnit.

### 5.1 Vaatimusmäärittelyt

QUBE-Servo 2 -järjestelmän asettamina vaatimuksina ovat maksimiarvot moottorin yli kulkevalle virralle ja moottoria ohjaavalle jännitteelle. Nämä vaatimukset ovat esiteltyinä alaluvussa 2.6. Muut vaatimukset tulevat säätöjärjestelmän halutusta käyttäytymisestä sekä halutuista stabiiliusvaroista.

Järjestelmän asettumisaika halutaan mahdollisimman nopeaksi, mutta ylitystä ei sallita. Asettumisaika mitataan asetusarvon muutoksesta hetkeen, kun järjestelmä on päätenyt pysyvästi 5 % sisään asetusarvostaan. Vaihevaraa halutaan järjestelmälle vähintään 40 astetta, vahvistusvaraa vähintään 6 dB ja stabiiliusvaran on oltava suurempi kuin 0.5. Vaatimukset on koottuna Taulukkoon 2.

**Taulukko 5.1.** Säätöjärjestelmälle asetetut vaatimukset

Vaatus	Arvo
Maksimivirta, jatkuva	0,5 A
Maksimivirta, hetkellinen	2,0 A
Maksimijännite, jatkuva	$\pm 10\text{ V}$
Maksimijännite, hetkellinen	$\pm 18\text{ V}$
Ylitys	0 %
Vaihevara	40 °
Vahvistusvara	6 dB
Stabiiliusvara	0,5

Taulukon 5.1 vaatimusten lisäksi järjestelmän halutaan toimivan muuttuvan kuorman kanssa. Luvussa 4.4 esitellyn säätimen kalibrointitoiminnon on pystyttävä tuottamaan stabiili ja vaatimukset täyttävä säädin kiekon vakiohitausmomentista 2,5 kertaiseen hi-

tausmomenttiin. Vaatimusten toteutuminen testataan kanttiaaltosignaaliilla, jonka amplitudi on  $200 \text{ rad/s}$  ja taajuus  $\pi/3$ . Lisäksi kanttiaallon offset asetetaan siten, että moottorin pyörimissuunta ei muutu.

## 5.2 PI-säätimen viritys

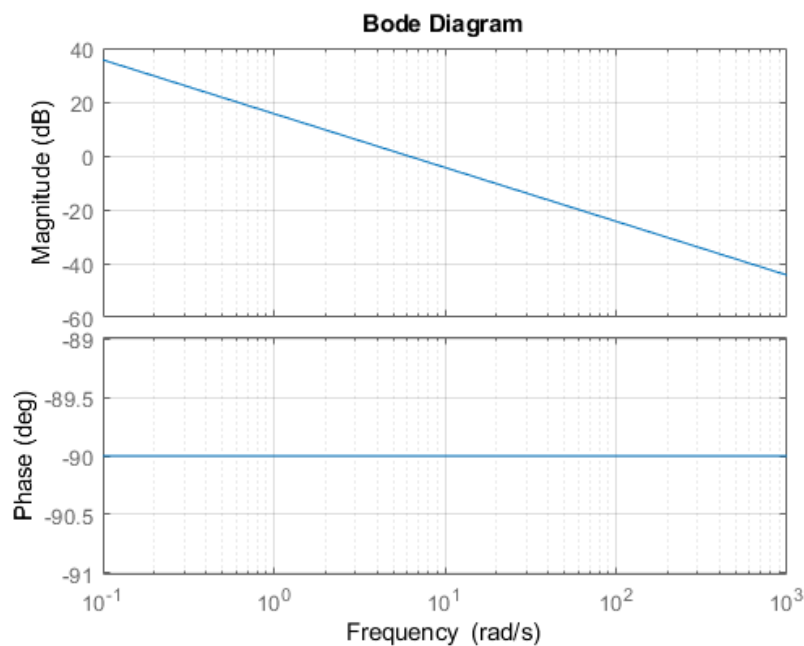
PI-säätimen virityksessä lähtökohtana oli mahdollisimman nopea asettumisaika 0 %:n ylityksellä. Muodostetaan avoimen järjestelmän siirtofunktio, joka kyseiselle järjestelmälle on yhtälöiden (2.12), (2.13) ja (4.4) mukaan

$$G_{avoin} = G_p G_{pi} = \frac{K_{dc}}{\tau_p s + 1} K_p \left( \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \right) \quad (5.1)$$

Yhtälöstä (5.1) nähdään järjestelmällä olevan kaksi napaa, jotka sijaitsevat kohdissa  $s = 0$  ja  $s = -\frac{1}{\tau_p}$  sekä yksi nolla kohdassa  $s = -\frac{1}{T_i}$ . Sijoittamalla PI-säätimen integrointiajan määrittämän nollan samalle kohdalle aikavakion määrittelemän navan kanssa, yhtälö (5.1) supistuu muotoon

$$G_{avoin} = \frac{K_{dc} K_p}{\tau_p s}, T_i = \tau_p \quad (5.2)$$

Siirtofunktiosta (5.2) nähdään suljetun järjestelmän stabiiliusvarat muodostamalla sen taajuusvaste. Nähdään järjestelmän vaihesiirron olevan koko ajan vakio  $-90^\circ$ . Tämä tuo



**Kuva 5.1.** Avoimen järjestelmän Bode-diagrammi

järjestelmälle 90 asteen vaihevaran ja äärettömän vahvistusvaran. Taajuusvaste on esitettyä kuvassa 5.1.

Järjestelmän stabiiliutta arvioitaessa tulee kuitenkin muistaa alaluvuissa 2.2 ja 4.2 tehdyt yksinkertaistukset induktanssin ja estimaattorin huomioita jättämisistä. Tämä poisti prosessilta ja avoimelta järjestelmältä kaksi napaa, joten kuvan 5.1 taajuusvaste ei vastaa reaalista järjestelmää suurilla taajuuksilla. Lisäksi järjestelmän mallinnusvirheet sekä mallintamaton dynamiikka vaikuttavat taajuusvasteen paikkaansa pitävyyteen. Todellisuudessa järjestelmän vaihesiirto leikkaa suurilla taajuuksilla -180 asteen rajan ja vahvistusvara on äärellinen luku. Vahvistusvara on kuitenkin todella suuri ja se tulee aina täyttämään 6 dB vaatimuksen.

Yhtälöistä (2.10) ja (5.2) saadaan muodostettua suljetun, negatiivisesti takaisinkytketyn, järjestelmän siirtofunktio

$$G_{suljettu} = \frac{\frac{K_{dc}K_p}{\tau_p s}}{1 + \frac{K_{dc}K_p}{\tau_p s}}. \quad (5.3)$$

Yhtälö (5.3) saadaan supistettua muotoon

$$G_{suljettu} = \frac{1}{\frac{\tau_p}{K_p K_{dc}} s + 1}. \quad (5.4)$$

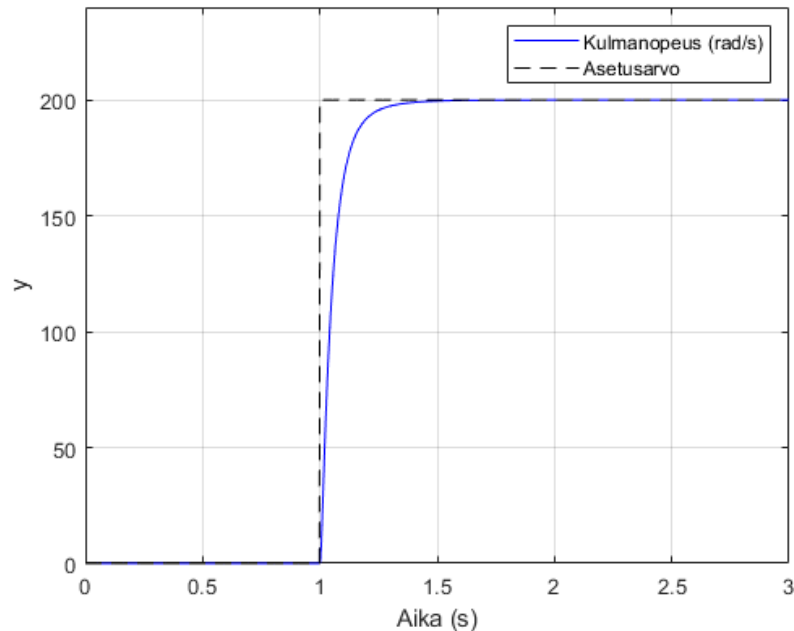
Yhtälön (5.4) mukaan takaisinkytketty järjestelmä on 1. kertaluokkaa, jonka DC-vahvistus on yksi ja aikavakio  $\frac{\tau_p}{K_p K_{dc}}$ . Viiveettömän ja nollattoman 1. kertaluokan järjestelmä ei voi värähdellä, joten vaatimus 0 %:n ylityksestä täyttyy [6, s. 235, 239]. Järjestelmän aikavakioon vaikuttavat prosessin aikavakio ja DC-vahvistus sekä PI-säätimen proportionaalivahvistus. Järjestelmän napa on aina reaallinen ja negatiivinen, joten järjestelmä on stabiili [6, s. 182]. Voidaan todeta järjestelmän toteuttavan määritellyt vaatimukset aina, kun integrointiajaksi valitaan prosessin aikavakio.

Kasvattamalla vakiovahvistusta, voidaan järjestelmää nopeuttaa teoriassa rajatta ja lisäksi kumota prosessin aikavakion kasvamisesta johtuva suljetun järjestelmän hidastuminen. Käytännössä alaluvussa 2.6 esitellyt prosessin vaatimukset kuitenkin toimivat rajoittavina tekijöinä järjestelmää nopeutettaessa, eikä ohjausjännitettä voi raskaan kuorman tapauksessa käyttää mielivaltaisesti, joten prosessin aikavakion kasvaminen hidastaa kokonaisjärjestelmää samassa suhteessa.

Vakiokuormalla säätimelle saadut parametrit ovat

$$K_p = 0,075 \text{ ja } T_i = 0,1, \quad (5.5)$$

joista  $K_p$ :n arvo on saatu iteroimalla ja  $T_i$  laskennallinen aikavakio yhtälön (15) mukaan. Toteutetun säätöjärjestelmän askelvaste on kuvassa 5.2.



**Kuva 5.2.** Suljetun järjestelmän askelvaste vakio inertialla,  $K_p = 0,075$

Kuvaajasta nähdään järjestelmän erosuureen suppenevan nollaan, ylitystä ei ole ja askelvaste on kohtuullisen nopea. Takaisinkytketyn systeemin käytännön toimivuus on dokumentoitu luvussa 6.

### 5.3 Kulmanopeusestimaattorin viritys

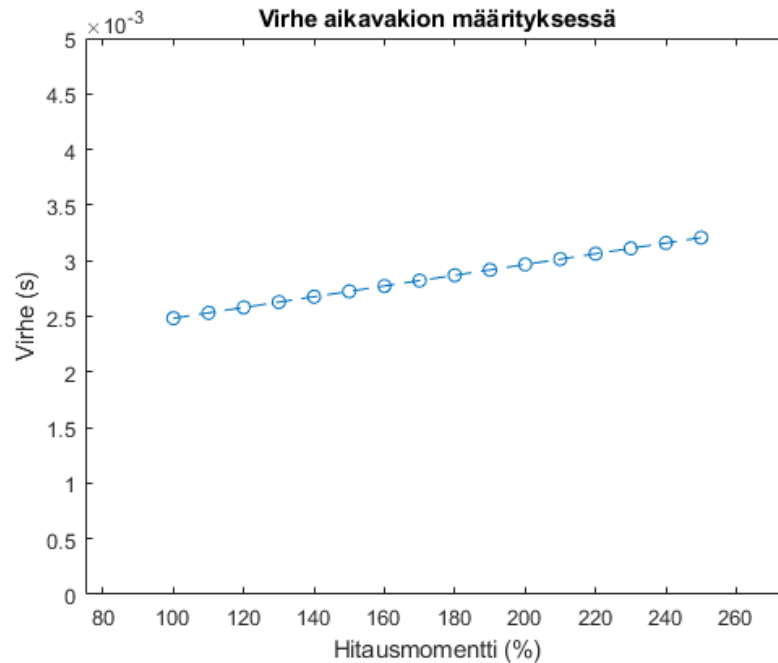
Alaluvussa 4.2 esitellyn kulmanopeusestimaattori viritetään valitsemalla arvo parametreille  $w_f$ . Estimaattorin täytyy olla selvästi nopeampi kuin prosessin dominoivan navan sekä estimaattorin tuottaman kulmanopeusarvon virhe laskennalliseen kulmanopeuteen ei saa olla yli 5 %. Prosessin navan aikavakio on luokkaa 0,1. Estimaattorin aikavakio täytyy valita tätä huomattavasti nopeammaksi, jotta estimaattori ei vaikuta järjestelmän dynamiikkaan. Iteroimalla löydetään suotimen kaistanleveydelle arvo 250, joka toteuttaa vaatimuksen maksimivirheen sekä aikavakion 0,004 suhteen.



nurkkataajuutta  $w_f$ . Tämä voi aiheuttaa kuitenkin kohinaa kulmanopeustietoon, joten tälle ei nähty tarvetta.

## 6.2 Kalibrointitoiminto

Kalibrointitoiminto testataan kasvattamalla inertia kiekon hitausmomenttia 25 %:n sykleissä ja vertaamalla kalibrointitoiminnolla saatua aikavakiota vastaavaan laskennalliseen aikavakioon. Saadut tulokset ovat kuvassa 6.2.

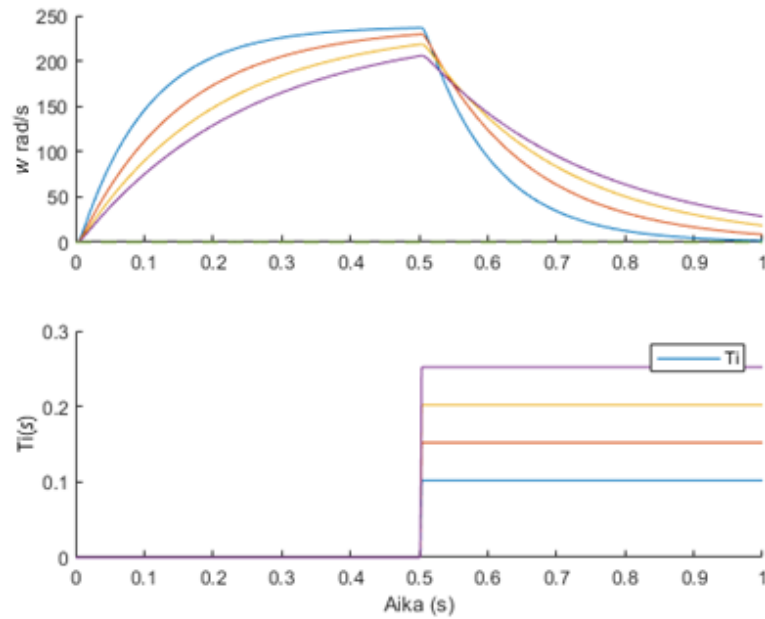


**Kuva 6.2.** Kalibrointitoiminnon virhe eri hitausmomenteilla

Kuvasta nähdään aikavakiovirheen olevan  $2,5\text{--}3,0 \times 10^{-3}$  sekuntia. Virhe johtuu alaluvussa 6.1 kerrotusta kulmanopeusestimaattorin virheestä, joka vaikuttaa aikavakion laskentaan. Aikavakion laskennan tulos on kuitenkin riittävä, eikä kyseinen virhe vaikuta oleellisesti säätimen viritykseen ja toimintaan.

Kalibrointitoiminnon tulee sijoittaa laskettu aikavakio PI-säätimen integrointiajaksi  $T_i$ . Testauksen tuloksena nähdään integrointiajan saavan oikean arvon kalibrointitoiminnon lopuksi. Tämä näkyy kuvassa 6.3.



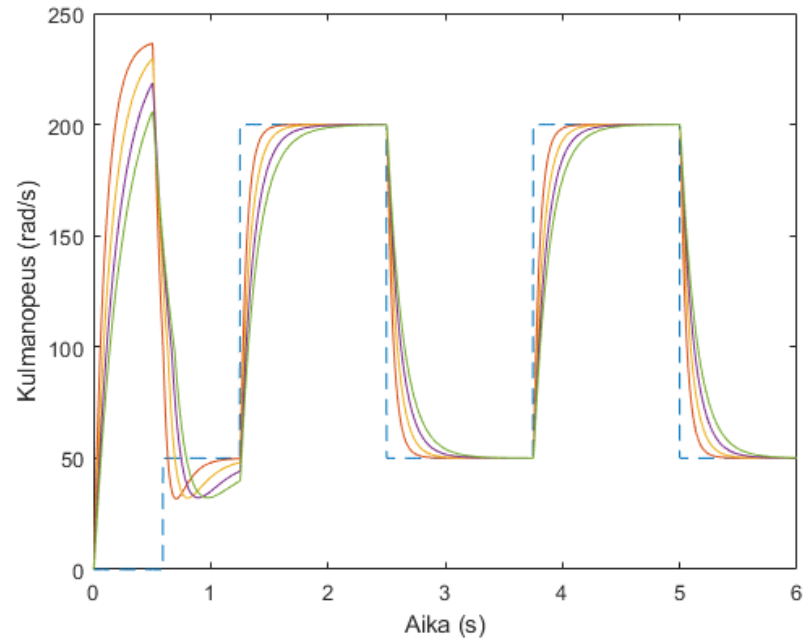


**Kuva 6.3.** Integrointiajan muutos kalibrointitoiminnon päättyessä

Kuvan 6.3. yläosassa on testisignaalin vaikutus kiekon kulmanopeuteen kalibrointitoiminnon aikana ja alaosassa on parametrin  $T_i$  arvo ajan funktiona. Kalibrointitoiminto toimii halutulla tavalla ja integrointiajaksi saadaan Qube-Servo 2 -prosessin aikavakio havaitun virheen tarkkuudella.

### 6.3 PI-säätimen testaus

PI-säädintä testataan simulaattorissa määritetyllä kanttiaaltosignaalilla sekä muuttuvilla kuormilla. Järjestelmän tulee suorittaa kalibrointitoiminto ja siirtyä sen jälkeen käyttämään PI-säätimen tuottamaa ohjausta. Lisäksi järjestelmän tulee saavuttaa asetusarvo mahdollisimman nopeasti täyttäen alaluvun 5.1 vaatimukset. Järjestelmän kyky seurata asetusarvomuuhtoksia on kuvassa 6.4.



**Kuva 6.4.** Kokonaisjärjestelmätesti kuormilla 100–250 %

Kuvasta 6.4. nähdään järjestelmän suorittavan kalibroinnin heti käynnistyksen jälkeen ja siirtyvän sen jälkeen seuraamaan asetustarvoa PI-säätimen toimesta. Säädin toimii halutulla tavalla ja kulmanopeus suppenee asetustarvoonsa kohtuullisen nopeasti. Säätimen ohjausjännitteen sekä servomoottorin käyttämän virran maksimiarvot testauksen aikana ovat taulukossa 6.1.

**Taulukko 6.1.** Maksimijännite ja -virta kuormilla 100–250 %

Kiekon kuorma (% nimelliskuormasta)	Maksimijännite (V)	Maksimivirta (A)
100	15,19	1,79
150	15,13	1,79
200	15,10	1,79
250	13,41	1,34

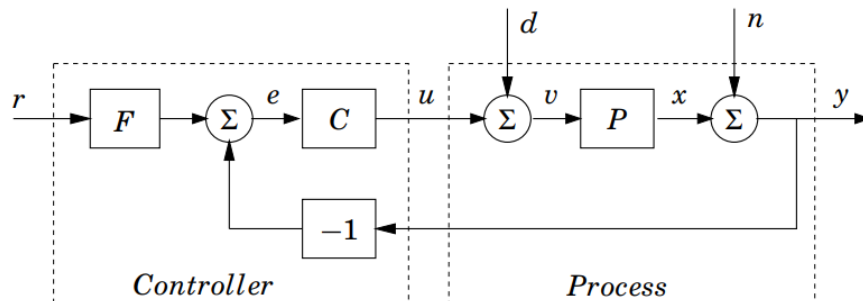
Taulukosta 6.1. nähdään maksimijännitteen ja -virran olevan noin 15,2 V ja 1,8 A. Nämä jäävät selvästi alle Taulukon 5.1 maksimiarvojen. PI-säädin toimii simulointien perusteella halutulla tavalla täyttäen kaikki määritellyt vaatimukset. Seuraavassa alaluvussa käsitellään säätöjärjestelmälle suoritettuja testiajoja fysikaalisella järjestelmällä.

## 6.4 Todellisen järjestelmän testaus

Reaalista järjestelmää testattiin ajamalla testisykli oikealla järjestelmällä. Saadut tulokset vastasivat pääosin simulaattorista saatuja tuloksia. Kalibrointitoiminnon tarkkuudessa reaalilla järjestelmällä oli vaihtelua, jonka takia 0 %:in ylitystavoitteeseen ei päästy. Hidastamalla säätimen integrointihaaran toimintaa säätämällä kalibrointitoiminnon tuottama integrointi aika hieman askelvasteen perusteella määritettyä aikavakiota suuremmaksi, saadaan kompensoitua mahdollinen virhe aikavakion laskennassa ja vaatimus ylityksen osalta täytettyä. Muilta osin ei hienosäädölle nähty tarvetta. Ohjausjännitteen maksimiarvoksi saatiin 7,5 V, joten järjestelmän nopeuttaminen olisi tarvittaessa mahdollista.

## 6.5 Gang-Of-Four-tarkastelu

Gang-Of-Four-siirtofunktiolla tarkoitetaan neljän siirtofunktion kokoelmaa, joiden avulla voidaan arvioida järjestelmän kykyä reagoida asetusarvomuutoksiin sekä kuormitus- ja mittaushäiriöihin. Gang-Of-Four-siirtofunktiokokoelma on yksinkertaistus Gang-Of-Six-siirtofunktiokokoelmasta, jossa asetusarvosuodin  $F(s)$  saa arvon 1 [6, s. 317]. Kuvassa 6.5. on negatiivisesti takaisinkytketyn järjestelmän rakenne, jonka toteuttaa myös tässä työssä suunniteltu säätöjärjestelmä.



**Kuva 6.5.** Takaisin kytetyn säätöjärjestelmän lohkokaavio [6, s. 316]

Jos  $F(s) = 1$ , niin sisäänmenojen  $r$ ,  $d$  ja  $n$ , jotka ovat asetusarvo, kuormitushäiriö ja mittaushäiriö, ja systeemin vasteen  $y$  sekä ohjauksen  $u$  välillä on siirtofunktiot:

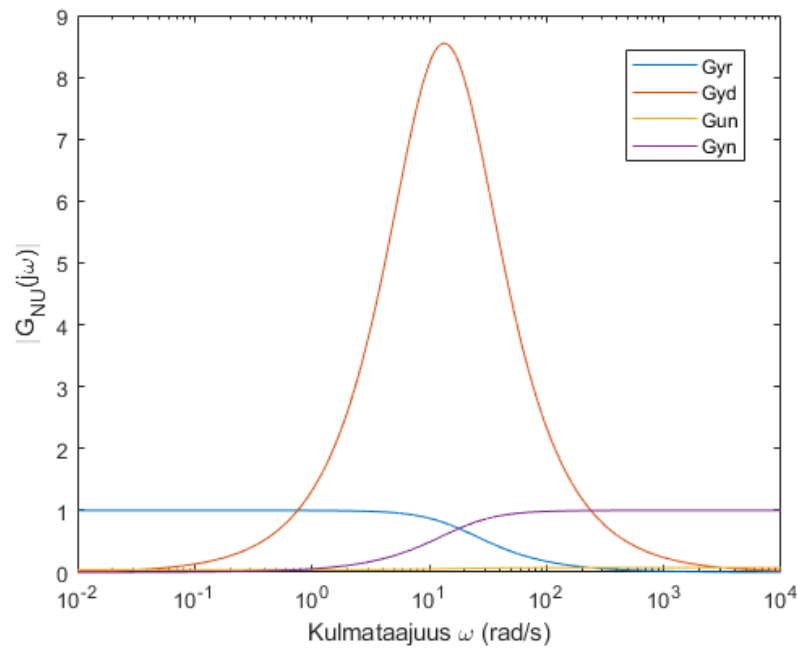
$$G_{yr} = \frac{PC}{1 + PC}, \quad (6.1a)$$

$$G_{yd} = \frac{P}{1 + PC}, \quad (6.1b)$$

$$G_{un} = \frac{C}{1 + PC}, \quad (6.1c)$$

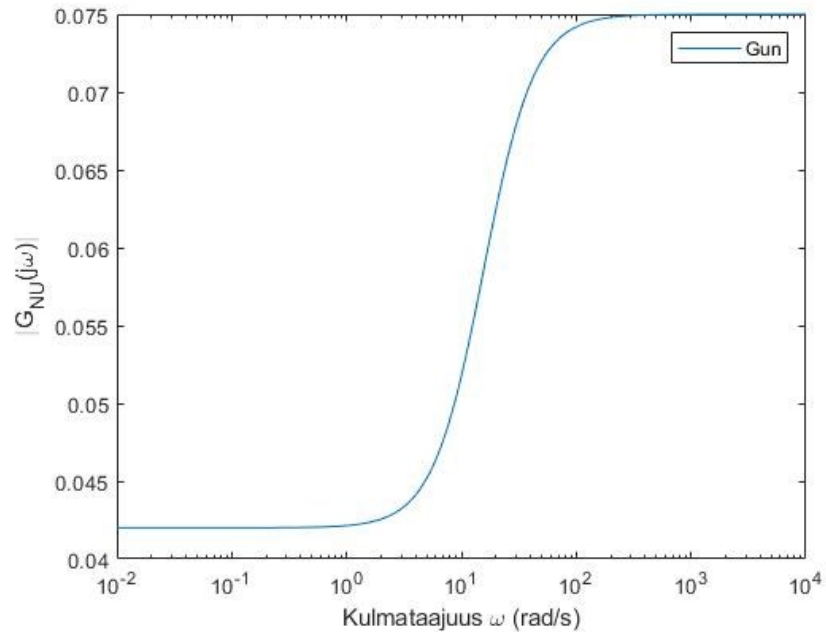
$$G_{yn} = \frac{1}{1 + PC}. \quad (6.1d)$$

$G_{yr}$  on siirtofunktio asetusarvosta ulostulon mittaukseen,  $G_{yd}$  kuormitushäiriöstä ulostulon mittaukseen,  $G_{un}$  mittaushäiriöstä ohjaukseen ja  $G_{yn}$  mittaushäiriöstä ulostulon mittaukseen. [6, s. 317] Sijoittamalla siirtofunktioihin (6.1a–6.1d) prosessin ja PI-säätimen siirtofunktiot saadaan Gang-Of-Four-esitys vastaamaan Qube-Servo 2 -järjestelmää. Kuvassa 6.6. on kyseisten siirtofunktioiden amplitudivahvistukset. Amplitudivahvistus kuvaa siirtofunktion vahvistuksen/vaimennuksen taajuuden funktiona.



**Kuva 6.6.** Gang-Of-Four-siirtofunktioiden amplitudivahvistukset

Kuvasta 6.6. nähdään siirtofunktion asetusarvosta ulostuloon maksimivahvistuksen olevan 1 ja se pysyy 1:ssä noin  $10 \text{ rad/s}$  kulmataajuuteen asti. Tämän vahvistuksen ollessa yksi, järjestelmä pystyy seuraamaan tarkasti asetusarvoaan. Siirtofunktion  $G_{yd}$  maksimivahvistus on noin 8,5. Säätojärjestelmä vahvistaa kuormitushäiriötä pahimmillaan tämän verran. Kuormitushäiriöihin reagointi tapahtuu hitaasti verrattuna muuhun järjestelmän toimintaan. Tämä johtuu erityisesti pienestä säätimen vakiovahvistuksesta  $K_p$ . Tästä johtuu myös siirtofunktion  $G_{un}$  pieni maksimivahvistus, joka on 0,075. Siirtofunktion  $G_{un}$  amplitudivahvistus on eriteltynä kuvassa 6.7.



**Kuva 6.7** Siirtofunktion  $G_{un}$  amplitudivahvistus

Järjestelmän kyky vaimentaa mittauskohinan vaikutus säätimen ulostuloon on hyvä. Neljännennen siirtofunktion  $G_{yn}$  maksimivahvistus on 1. Järjestelmä ei vahvista eikä vaimenna mittauskohinan vaikutusta ulostuloon korkeilla taajuuksilla.

## 7. YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin negatiivisesti takaisinkytketty säätöjärjestelmä servomoottorin kulmanopeussäätöön. Työssä toteutettiin lisäksi prosessin aikavakioon perustuva säätimen kalibrointitoiminto, jonka avulla järjestelmää voidaan käyttää ajojen välillä muuttuvalla kuormalla stabiilisti ja tavoitteiden mukaisesti. Säädin toteutettiin PI-säätimenä, jonka integrointiaika parametrisoitiin prosessin aikavakion mukaan ja säätimen proportionaalivahvistus valittiin iteroimalla. Kalibrointitoiminnon toteutuksessa hyödynnettiin 1. kertaluokan mallin askelvastetta ja sen tunnettuja ominaisuuksia. Askelvaste määräytyy prosessin DC-vahvistuksen ja aikavakion perusteella. Kalibrointitoiminnossa käytettiin askelvastedatasta määriteltyä aikavakiota, jonka tarkkuus oli riittävä toiminnon toteutukseen. Servomoottorin kulmanopeuden mittaukselle ei ole tukea Qube-Servo 2 -järjestelmässä, joten kulmanopeus estimoitiin sopivalla suotimella. Suodinta käyttäen kulman mittauksesta voitiin muodostaa kulmanopeusestimaatti riittävällä tarkkuudella. Kulmanopeusestimaattori viritettiin valitsemalla suotimelle sopiva kaistanleveys.

Järjestelmää testattiin suunnitteluvaiheessa simulaattorilla ja valmista toteutusta sekä simulaattorilla että fysikaalisella järjestelmällä. Pientä hienosäätöä lukuun ottamatta järjestelmään ei tarvinnut tehdä muutoksia ja se täytti asetetut vaatimukset. Simulaattorissa sekä säätimen suunnittelussa tehtiin muutamia yksinkertaistuksia mallinnuksen ja suunnittelun helpottamiseksi. Sähkömoottorin mallista jätettiin induktanssin vaikutus huomiotta sen ollessa huomattavasti moottorin resistanssia pienempi. Lisäksi kulmanopeusestimaattorin napaa ei huomioitu säätimen suunnittelussa, vaan oletettiin järjestelmän siirtofunktio suoraan ohjauksesta kulmanopeuteen. Yhtenevien tulosten mukaan tehdyt yksinkertaistukset eivät vaikuttaneet merkittävästi testaustuloksiin.

Toteutettu säätöjärjestelmä suoriutuu hyvin sille osoitetusta säätötehtävästä. Säätötehtävän muuttuessa (esimerkiksi servosäädöstä reguloivaan säätöön) sitä voisi kehittää esimerkiksi mukautuvalla proportionaalivahvistuksella tai lisäämällä järjestelmään mittauksen muutoksiin reagoiva derivointihaara. Tässä työssä näille ei ollut tarvetta yksinkertaisen säätötehtävän sekä stabiilin laitteiston ja ympäristön johdosta.

## LÄHTEET

- [1] Quanser, QUBE-Servo 2 User Manual, verkkodokumentti, Markham, 2016, 14 p., haettu (22.10.2019), Saatavissa: [www.quanser.com/resources](http://www.quanser.com/resources).
- [2] Quanser, QUBE-Servo 2 First Principles Modeling, verkkodokumentti, Markham, 2016, 6 p. haettu (10.03.2019), Saatavissa: [www.quanser.com/courseware-resources](http://www.quanser.com/courseware-resources).
- [3] F. Golnaraghi, B.C. Kuo, Automatic control systems, 9th ed., Wiley, Hoboken, 2010, 786 p.
- [4] K. Ogata, Modern control engineering, 5th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010, 894 p.
- [5] MathWorks, Documentation, verkkodokumentti, Haettu (10.11.2019), Saatavissa: [www.mathworks.com/help/curvefit/fit](http://www.mathworks.com/help/curvefit/fit)
- [6] K. J. Åström ja R. M. Murray, Feedback Systems. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2008.

# LIITE A: KALIBROINNIN SUORITTTAVA TILAKONE

